การตรวจเอกสาร

ทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในการที่จะทำการสร้างระบบเตือนภัยการขาดออกซิเจนที่ละลายในน้ำโดยใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Dissolved Oxygen Warning System Powered by Solar Cells) ซึ่งมีทฤษฎีที่เข้ามาเกี่ยวข้องมาก โดยเริ่มตั้งแต่การวิเคราะห์คุณภาพของน้ำที่จะนำมาใช้เลี้ยงสัตว์น้ำ, ทฤษฎีเบื้องต้นของเครื่องมือวัด, หัวโพรบวัดออกซิเจน, ระบบพลังงานแสงอาทิตย์, คุณสมบัติโครงสร้างของ MCS-51, ส่วนประกอบทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ และส่วนประกอบทางกล

1. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

น้ำประกอบด้วยไฮโดรเจน (H)2 อะตอม และออกซิเจน (O)1 อะตอม หรือที่รู้จัก คือ H_2O ซึ่งยึดเกาะกันโดยแรงร่วม (พันธะ Covalent bonding) น้ำจะมีอยู่ 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว ก๊าซ และเปลี่ยนหมุนเวียนกัน น้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีแร่ธาตุปนอยู่ด้วยเนื่องจากน้ำฝนไหลผ่านดินและสะสมแร่ธาตุระหว่างการไหลลงบ่อ การสะสมมี 2 ขบวนการ คือ ขบวนการที่หนึ่งคือขบวนการทางเคมี คือ การที่น้ำทำให้ดินและหินเปียกแล้วอ่อนตัว (Hydration) และปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (Oxidation) ระหว่างแร่ธาตุในน้ำกับธาตุในดิน ส่วนขบวนการที่สองคือขบวนการทางฟิสิกส์ คือ เปลี่ยนจากของแข็งเป็นของเหลว ของเหลวเป็นของแข็งและการแยกตัวของผิวดินและหินในทางการประมงนั้นน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะทำการวิเคราะห์ 3 ประเภทด้วยกัน คือ

- ทางกายภาพ (Physical) เช่น สี(color), อุณหภูมิ, ความขุ่น และสารแขวนลอย

- ทางเคมีภาพ (Chemical) เช่น ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH), ออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen, DO) คาร์บอนไดออกไซค์, ความเค็ม (Salinity) และไนเตรท (Nitrate, NO_3)

- ทางด้านชีวภาพ(Biological) เช่น แพลงตอนพืชและสัตว์ (Planton), แบคทีเรีย (Bacteria) พืชน้ำ (Aquatic macrophytes), และเชื้อโรค (Pathogens)

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำเราจะคำนึงถึงวัตถุประสงค์โดยการวิเคราะห์ในห้อง ปฏิบัติการ เพื่อตามวัตถุประสงค์คือ การวิเคราะห์ด้านคุณภาพ (Quantitative analysis) เพื่อหาชนิดของสารประกอบที่อยู่ในน้ำ และการวิเคราะห์ด้านปริมาณ (Quantitative analysis) เพื่อหาปริมาณของสารประกอบที่ผสมอยู่ในน้ำ เช่น ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen, DO) การวิเคราะห์ด้านปริมาณนี้มีอยู่ 3 ชนิดคือ

- การวิเคราะห์น้ำหนัก (Gravimetric analysis) คือคิดน้ำหนักสารประกอบที่ผสมอยู่ในน้ำ

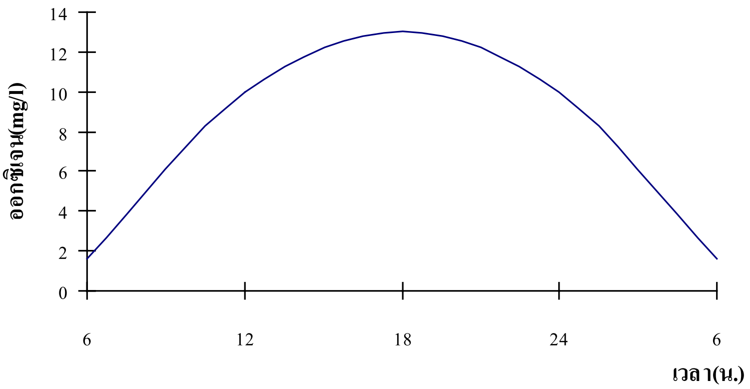
- การวิเคราะห์ทางปริมาตร (Volumetric analysis) โดยการเทียบกับปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน ที่ทราบความเข้มข้น เมื่อปฏิกิริยาสมบูรณ์ เรียกว่า ไตเตรท (Titration) เช่นการวัดค่า pH และค่า DO ซึ่งในการวิจัยใช้วิธีนี้เพื่อหาค่าแรงดันที่ได้จากหัววัด DO ที่ค่าออกซิเจนต่าง ๆ

- การวิเคราะห์โดยการเทียบสี (Colorimetric analysis) เป็นการวิเคราะห์ที่สะดวก รวดเร็ว และประหยัด ใช้หลักการคือทำให้เกิดสีในสารละลายตัวอย่าง ซึ่งเป็นสัดส่วนกับสารประกอบที่อยู่ในสารละลาย โดยใช้ Spectrophotometer

ในงานวิจัยนี้ส่วนมากจะเป็นการตรวจสภาพของน้ำในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำซึ่งที่จำเป็นในการดำรงชีวิตและเจริญเติบโต ซึ่งในการตรวจสอบคุณภาพน้ำมีปัจจัยเกี่ยวข้องดังนี้

1.1 ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen) ก๊าซออกซิเจนเป็นก๊าซที่ละลายน้ำได้น้อยมากส่วนมากจะขึ้นอยู่กับความดันบรรยากาศ, ความเค็มและอุณหภูมิของน้ำที่อุณหภูมิต่ำความสามารถในการละลายของออกซิเจนจะดีกว่าขณะที่อุณหภูมิสูงดังนี้ ที่ 0 ^{o}C จะมีความสามารถในการละลายอยู่ในช่วงระหว่าง 14.6 mg/l, ที่ 32 ^{o}C จะมีความสามารถในการละลายอยู่ในช่วงระหว่าง 7.32 mg/l และ ที่35 ^{o}C จะมีความสามารถในการละลายอยู่ในช่วงระหว่าง 7.04 mg/l (ไมตรี, 2538) และที่ความดันบรรยากาศปกติอัตราการละลายของออกซิเจนจะลดลง ถ้าความเค็มเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปปริมาณของออกซิเจนที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะมีจุดอิ่มตัว (Saturated) ถ้าปริมาณออกซิเจนเท่ากับปริมาณออกซิเจนมาตรฐาน แต่ถ้ามีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าปริมาณออกซิเจนมาตรฐาน เรียกว่า ออกซิเจนต่ำกว่าจุดอิ่มตัว (Under Saturated) และถ้ามีปริมาณออกซิเจนสูงกว่าปริมาณออกซิเจนมาตรฐาน เรียกว่า ออกซิเจนสูงกว่าจุดอิ่มตัว (Super Saturated) อุณหภูมิค่อนข้างจะมีผลต่อปริมาณออกซิเจนมาก โดยเฉพาะในหน้าร้อน จะมีปริมาณออกซิเจนต่ำและขณะเดียวกันก็ต้องการ

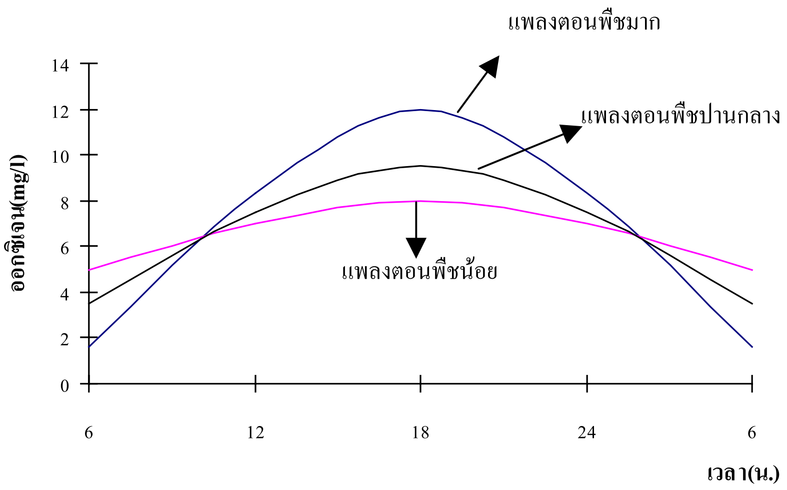
ออกซิเจนไปใช้ในการย่อยสลาย และปฏิกิริยาต่างๆก็ทำให้เกิดการขาดออกซิเจน จากที่กล่าวมาข้างต้นทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนออกซิเจนระหว่างน้ำกับอากาศ ปริมาณของออกซิเจนที่ละลายในน้ำจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ อย่างโดยเฉพาะ กรณีที่สัตว์น้ำใช้ออกซิเจนในการหายใจในเวลากลางวันและกลางคืน ส่วนพืชน้ำจะให้ออกซิเจนในเวลากลางวันโดยการสังเคราะห์แสงและในเวลากลางคืนพืชไม่มีการสังเคราะห์แสงแต่ก็ยังใช้ออกซิเจน ทำให้ปริมาณออกซิเจนค่อย ๆ ลดลงจนถึงรุ่งเช้า หากมีพืชน้ำมาก ออกซิเจนก็จะขาดแคลนและหมดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนในช่วงบ่ายก็จะมีออกซิเจนเพิ่มขึ้นมาก เพราะการสังเคราะห์แสงของพืชจะให้ปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 1



<u>ภาพที่ 1</u> การแปรผันในรอบวันของออกซิเจนในบ่อปลา

ที่มา: เวียง (2525)

นอกจากนี้แพลงตอนพืชก็จะมีส่วนเกี่ยวข้องด้วย แพลงตอนพืชมีผลต่อออกซิเจนในรอบวันด้วย โดยเฉพาะถ้ามีแพลงตอนพืชบนผิวน้ำมากออกซิเจนบนผิวน้ำก็จะมาก แต่บริเวณก้นบ่อออกซิเจนจะน้อยหรือแทบจะไม่มีเลย ปรากฏการณ์แปรผันนี้จะพบได้ในบ่อที่มีแพลงตอนพืชมาก และจะเกิดปรากฏการณ์นี้น้อยในบ่อที่มีแพลงตอนพืชน้อย ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การแปรผันในรอบวันของออกซิเจนที่มีเพลงตอนพืช

ที่มา: เวียง (2525)

จะเห็นว่าในบ่อที่แพลงตอนพืชน้อยตอนเช้าออกซิเจนจะไม่ต่ำกว่า 5 mg/l ถ้าแพลงตอนพืชมีปานกลาง ออกซิเจนจะไม่สูงกว่า 4 mg/l และในบ่อที่แพลงตอนพืชมากออกซิเจน ก็จะเหลือไม่เกิน 2 mg/l ถึงแม้ตอนบ่ายปริมาณออกซิเจนจะสูงกว่าจุดอิ่มตัวก็ตาม (เวียง, 2525)

1.2 ออกซิเจนกับสัตว์น้ำ ออกซิเจนจะมีผลกับสัตว์น้ำ เช่น กุ้งก้ามกรามและกุ้งกุลาดำบ่อกุ้งควรมีออกซิเจน 4 mg/l กุ้งเล็กต้องการออกซิเจนมากกว่ากุ้งใหญ่ เช่น กุ้งขนาดน้ำหนัก 0.1-0.5 g ต้องใช้ออกซิเจนชั่วโมงละ 0.1-0.2 mg/l กุ้งขนาดน้ำหนัก 10 -20 g ใช้ออกซิเจนชั่วโมงละ 0.3 mg/l เมื่อปริมาณออกซิเจนลดลงควรทำ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การแก้ไขเมื่อออกซิเจนลดลง

ปริมาณออกซิเจน	วิธีการแก้ไข
น้อยกว่า 4 mg/l	ตีน้ำได้
น้อยกว่า 3 mg/l	งดอาหาร 20-70%
น้อยกว่า 2 mg/l	งดอาหารรอจนออกซิเจน > 3 mg/l

ที่มา: กองส่งเสริมกรมประมง (2538)

ในช่วงเช้าออกซิเจนจะลดต่ำลงมากกรณีที่เลี้ยงกุ้งหนาแน่นมาก ถ้ามีเครื่องตีน้ำไม่เพียงพอ กุ้งอาจจะลอยมาบนผิวน้ำตั้งแต่หลังเที่ยงคืนจนถึงเช้ามืดเมื่อออกซิเจนที่ละลายในน้ำอยู่ในช่วง 2 - 3 mg/l ถ้าออกซิเจนสูงกว่านี้กุ้งจะไม่ลอยแต่ถ้าออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำกว่า 4 mg/l กุ้งจะไม่แข็งแรง กินอาหารน้อย และถ้าออกซิเจนที่ละลายในน้ำต่ำ ขณะที่กุ้งลอกคราบกุ้งจะตาย (กองส่ง เสริมกรมประมง, 2538) ดังนั้นควรวัดค่าปริมาณออกซิเจนอย่างสม่ำเสมอในช่วงเช้าและกลางคืน หรือวันละหลายครั้งสำหรับในบ่อที่เลี้ยงอย่างหนาแน่นและกุ้งขนาดใหญ่ ควรใช้เครื่องมือช่วยตรวจสอบปริมาณออกซิเจน นอกจากนี้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำก็มีผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของปลาในด้านต่าง ๆ ได้แก่ การเจริญเติบโต, การเผาผลาญอาหาร, การกินอาหาร ความต้านทานต่อโรค, พฤติกรรมของปลา ปลาขนาดเล็กใช้ออกซิเจนต่อหน่วยน้ำหนักมากกว่าปลาขนาดใหญ่ และอัตราการใช้ออกซิเจนของปลาที่เคลื่อนที่จะใช้ออกซิเจนสูงกว่าปลาที่อยู่นิ่ง ส่วนกรณีที่ปลากินอาหาร ก็จะมีอัตราการใช้ออกซิเจนสูงของกว่าปลาที่ยังไม่ได้กินอาหารเนื่องจากปลาต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเพื่อกระบวนการย่อยอาหาร (Moos and Scott, 1964) เมื่อปริมาณออกซิเจนในน้ำลดต่ำลงจะมีผลให้ปลากินอาหารน้อยลง ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ปลาเจริญเติบโตช้า จากที่กล่าวมานั้นจะเห็นว่าออกซิเจนที่ละลายน้ำมีผลต่อสัตว์น้ำเกือบทุกชนิดเพราะถ้าออกซิเจนน้อยจะมีผลกับสัตว์น้ำดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระดับต่ำสุดของออกซิเจนที่ทำให้ปลาตาย

ชนิดปลา	ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (mg/l)
ปลาทอง	0.1-2.0
ปลาเฉา	0.2-0.6
ปลาไน	0.2-0.8
ปลาลิ่น	0.3-1.1
ปลายี่สกเทศ	0.7
ปลาสลิด	1.6-3.8
ปลาสวาย	1.1-2.4
ปลานิล	0.8-1.2
ปลาตะเพียนขาว	0.4-1.1

ที่มา: ไมตรี (2528)

2. ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการวัด

2.1 การแบ่งหน้าที่การทำงานของระบบการวัดค่า (Functional Elements of Measurement System) อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ต่าง ๆ ในระบบ ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์พื้นฐานของระบบการวัดค่าทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วย

2.1.1 เซ็นเซอร์ (Sensor) เซ็นเซอร์คือส่วนที่รับสัญญาณจากกระบวนการในตอนแรก หรือเป็นตัวกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าจากปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งในงานวิจัยนี้ก็คือ หัวโพรบวัดออกซิเจน (DO sensor) เรียกว่า "สัญญาณอินพุท" เซ็นเซอร์ทั่วไปมีลักษณะและคุณสมบัติ ดังนี้

- มีความสามารถในการรับสัญญาณและตรวจจับพร้อมทั้งรับความรู้สึกค่าสัญญาณอินพุตที่ต้องการและต้องไม่มีความไวกับสัญญาณอื่น ๆ (ที่ไม่ต้องการ) ขณะที่ทำการวัด

- มีความสามารถต่อการดัดแปลงระบบ (amenable) นั่นคือให้ง่ายต่อการปรับปรุงระบบโดยใช้ อุปกรณ์ที่อยู่ภายในกระบวนการเดิม ๆ ได้ เช่น รูปสัญญาณของเซ็นเซอร์ที่มักจะทำให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า

- ต้องมีความแน่นอน (accuracy) ที่ดี

- ต้องมีค่าความสามารถในการทำซ้ำ (reproducibility) ที่ดี (เช่นความเที่ยงตรง) และต้องมีผลตอบสนองและความน่าเชื่อถือที่ดี

- ต้องมีขนาด (amplitude) ที่เป็นเชิงเส้น

- ต้องมีความสามารถในการต่อต้านสิ่งรบกวนจากสิ่งแวดล้อม

2.1.2 อุปกรณ์ขยายสัญญาณหมายถึงอุปกรณ์ที่เพิ่มขนาดของสัญญาณ ปกติอุปกรณ์ขยายสัญญาณดังกล่าวนี้ จะอยู่รวมกับอุปกรณ์ปรับสภาพสัญญาณ อุปกรณ์ขยายสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งใช้วงจรทรานซิสเตอร์และไอซี (พจนาฏ, 2546)

$$\text{การขยายสัญญาณ} = \frac{Vo}{Vin} \qquad (1)$$

โดยที่

Vin : สัญญาณอินพุท

Vo : สัญญาณอินพุท

2.1.3 อุปกรณ์กรองสัญญาณ อุปกรณ์กรองทางไฟฟ้า เพื่อกำจัดการค้างอยู่ของสัญญาณไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น วงจร R-C อย่างง่าย หรือวงจรกรองทางไฟฟ้าใด ๆ ที่มีความเหมาะสม

2.1.4 อุปกรณ์ปรับสภาพสัญญาณไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาปรับแต่งคุณภาพของสัญญาณที่ได้มาจากเซ็นเซอร์เพื่อให้ได้สัญญาณที่เหมาะสมกับการไปใช้งานในด้านต่าง ๆ ซึ่งมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้ อุปกรณ์ชดเชยสัญญาณ หรืออุปกรณ์ทำให้สัญญาณเป็นเชิงเส้น อุปกรณ์ดิฟเฟอเรนเชียล หรืออินทิเกรชัน, อุปกรณ์แปลงสัญญาณ จากสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล และอุปกรณ์เปลี่ยนสัญญาณ หรืออุปกรณ์สุ่มสัญญาณ เป็นต้น

2.1.5 อุปกรณ์แสดงผล เป็นอุปกรณ์รักษาค่าทางเอาต์พุต และทำหน้าที่แสดงค่าที่มีขนาดเดียวกันนี้ให้สามารถเห็นได้อย่างแน่ชัดเช่น หน้าจอ LCD, เข็มวัดของมิเตอร์ และLED 7 ส่วน (7 Segment)

2.2 การสอบเทียบค่าที่ต้องการ (Calibration) เป็นการกระทำเพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องของการเปรียบเทียบจำนวน ระหว่างจำนวนที่เราทราบกับค่ามาตรฐานที่เราทราบ และเอาต์พุตของระบบการวัดเมื่อวัดจำนวนเดียวกัน ถ้าผลตอบสนองของ เอาต์พุต-อินพุต ของระบบมีค่าเป็นเชิงเส้นแล้ว การสอบเทียบแบบจุดเดียว (single-point) ก็เพียงพอ นั่นคือเพียงแต่ทราบค่ามาตรฐานของอินพุตอย่างเดียวก็เพียงพอ ถ้าระบบไม่เป็นเชิงเส้น เราก็ต้องใช้จุดของค่ามาตรฐานทางด้านอินพุตในการวัดระบบ เพื่อสอบเทียบค่าทางด้านเอาต์พุตให้ถูกต้องซึ่งมีลำดับขั้นดังนี้

2.2.1 การสอบเทียบขั้นปฐมภูมิ (Primary Calibration) เมื่ออุปกรณ์หรือระบบถูกสอบเทียบในขั้นปฐมภูมิ กระบวนการดังกล่าวก็จะถูกจัดอยู่ในเทอมของการสอบเทียบขั้นปฐมภูมิ หลังจากการสอบเทียบปฐมภูมิแล้ว อุปกรณ์ดังกล่าวก็จะถูกนำไปใช้เป็นอุปกรณ์สอบเทียบขั้นทุติยภูมิ

2.2.2 การสอบเทียบขั้นทุติยภูมิ (Secondary Calibration) เมื่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบขั้นทุติยภูมิถูกใช้ต่อไปในการสอบเทียบอุปกรณ์อื่น จะทำให้ความแน่นอนลดน้อยลงไป การสอบเทียบในขั้นนี้ใช้งานกันอย่างกว้างขวางในการปฏิบัติงานของห้องทดลองทั่วไปในงานอุตสาหกรรม

2.2.3 การสอบเทียบโดยตรง เมื่อทราบค่าทางด้านอินพุต การสอบเทียบโดยตรง เมื่อรู้ค่าทางด้านอินพุต มีลักษณะเหมือนกับความแน่นอนของการสอบเทียบแบบทุติยภูมิ ดังนั้น อุปกรณ์ที่ถูกสอบเทียบโดยตรง จึงใช้เป็นอุปกรณ์สอบเทียบในขั้นทุติยภูมิด้วย

2.3 ความเที่ยงตรง (Precision) ความเที่ยงตรงกำหนดเป็นความสามารถของเครื่องมือวัดที่จะผลิตหรือสร้างชุดในการอ่านค่าที่แน่นอนภายใต้ค่าความแน่นอน (accuracy) ที่กำหนดให้ เช่น ทรานสดิวเซอร์ตัวหนึ่งกำหนดค่าความแน่นอน (accuracy) ทางด้านอินพุตที่ทราบค่ามา แล้วทำการอ่านค่าเครื่องมือวัดดังกล่าวที่อยู่ภายในค่า ± 1% ซ้ำ เราก็จะได้ค่าความเที่ยงตรง หรือกล่าวได้อีกว่า ความผิดพลาดจากความเที่ยงตรงของเรื่องมือวัดดังกล่าวมีค่าเป็น ± 1% ดังนั้น เครื่องมือวัดที่มีค่าความเที่ยงตรงสูง ๆ จะต้องมีรายละเอียดของค่าทางด้านเอาต์พุตที่เหมือนกันทุกครั้ง เมื่อป้อนอินพุตค่าเดียวกัน

ความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำซ้ำ (repeatability) ซึ่งกำหนดความสามารถของเครื่องมือวัดที่จะสร้างกลุ่มการวัดที่มีค่าเหมือน ๆ กัน โดยใช้เครื่องมือวัดตัวเดียวกัน ภายใต้สภาวะเดียวกัน ค่าความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัด สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ค่าความแน่นอนกับความเที่ยงตรง และความแน่นอนเป็นตัวแสดงดีกรีความถูกต้องในการวัดซึ่งเทียบกับค่าที่แท้จริง ส่วนความเที่ยงตรงเป็นตัวแสดงดีกรีความสามารถในการทำซ้ำของการวัดหลาย ๆ ค่าที่เป็นอิสระต่อค่าทางด้านอินพุตที่ต้องการ โดยอ้างอิงจากสภาพเดียวกัน เพื่อแสดงสถานะของตัวอย่างดังกล่าวบ่อยครั้งไม่สามารถจะทราบค่าที่แท้จริง (true value หรือ actual value) จากการวัด เราจึงใช้ค่าความแน่นอน (accuracy) เป็นตัวอธิบายความผิดพลาดที่เป็นไปได้ และในความเป็นจริง ก็เป็นการยากที่จะจำกัดหรือบอกค่าจริงได้ เราจึงอาจจะต้องใช้ค่าใหม่ที่เรียกว่า ค่าที่คาดหวัง (expected value) แทน

ความสามารถในการวัดนั้นยังยืนยันค่าที่คาดหวัง ก็จะเกิดค่าความผิดพลาดขึ้น ค่าความผิดพลาดสามารถแสดงได้ทั้งค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ (absolute error) และความผิดพลาดเป็นเปอร์เซ็นต์ (percentage of error) (พจนาฏ, 2546)

ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์จะแสดงค่าเป็น

$$e = Y_n - X_n \tag{2}$$

เมื่อ

e = ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์(absolute error)

Y_n = ค่าอุดมคติ (expected value)

X_n = ค่าที่วัดได้ (actual value)

ถ้าเราแสดงความผิดพลาดเป็นเปอร์เซ็นต์ สามารถเขียนได้เป็น

$$\text{percent error} = \frac{\text{absolute error}}{\text{expected value}} \times (100) \tag{3}$$

หรือ

$$\text{percent error} = \frac{e}{Y_n}(100) \tag{4}$$

โดยการแทน e จากสมการ (4)

$$\text{percent error} = \left|\frac{Y_n - X_n}{Y_n}\right|(100) \tag{5}$$

บ่อยครั้งที่เรามักจะแสดงค่าที่ได้จากการวัด ในเทอมของความแน่นอนสัมพัทธ์ (relative accuracy) มากกว่าค่าความผิดพลาด

$$A \quad = \quad 1-\left|\frac{Y_n - X_n}{Y_n}\right| \qquad (6)$$

เมื่อ A คือ ความแน่นอนสัมพัทธ์ (Relative Accuracy)

ค่าความแน่นอนที่แสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ a แสดงได้เป็น

$$a \quad = \quad 100\% - \%\ \text{percent error} \quad = \quad A \times 100 \qquad (7)$$

3. <u>ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับโพรบวัดออกซิเจนในน้ำ</u>

เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนในปัจจุบันขณะนี้สามารถวัดออกซิเจนได้ทั้งในของเหลว และในอากาศโดยจะแบ่งตามลักษณะโครงสร้างของหัวโพรบวัดออกซิเจนซึ่งแบ่งได้ 4 แบบ

- กัลป์วานิกส์เซลล์ (Galvanic cell)

- โพลาโรกราฟิกเซลล์ (Polarographic cell) แบบ (Clark Electrode)

- มัลติเพิล-แอโนดเซลล์ (Multiple-anode cell)

- แทลเลียมเซลล์ และวัดโดยวิธีอื่นๆ (Thallium cell and other detector)

เนื่องจากโพรบที่ใช้ในโครงงานนี้ คือ โพรบชนิดกัลป์วานิกส์เซลล์ ซึ่งรายละเอียดในส่วนของกัลป์วานิกส์เซลล์ มีดังต่อไปนี้คือ

3.1 กัลป์วานิกส์เซลล์ (Galvanic cell) กัลป์วานิกส์เซลล์เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดหาออกซิเจนได้ทั้งในของเหลว และอากาศ วัดได้ในช่วง 0-20 ppm ประกอบด้วยสารอิเล็กโตรไลต์ และมี 2 ขั้วอิเล็กโตรด เมื่อออกซิเจนแพร่ผ่านเซลล์แผ่นเมมเบรนเข้าสู่สารอิเล็กโตรไลต์ จนความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำตัวอย่าง และสารอิเล็กโตรไลต์เข้าสู่สภาวะสมดุล ที่ขั้วคาโทด (cathod) จะมีการจ่ายกระแสอิเล็กตรอนจากภายนอก ซึ่งทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดทั้งสอง เมื่อออกซิเจน 1 โมเลกุล แพร่ผ่านแผ่นเมมเบรนเข้ามาสัมผัสกับขั้วคาโทด จะจ่าย 4 อิเล็กตรอน ให้แก่

ออกซิเจนและรวมตัวกับ 2 โมเลกุลของน้ำได้ 4 ไฮดรอกไซด์เกิดขึ้น เป็นสาเหตุให้เกิดการไหลของกระแสอิเล็กตรอน ไหลผ่านสารอิเล็กโตรไลต์ ปริมาณการไหลของกระแสอิเล็กตรอน ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของออกซิเจนในสารละลายตัวอย่างที่ทำการวัด

วัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโตรดโดยทั่วไป เป็นเงินหรือตะกั่ว สารอิเล็กโตรไลต์ใช้โปรตัสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ส่วนขั้วคาโทด จำเป็นต้องใช้โลหะมีสกุลพวก เงิน หรือทอง ขั้วของอะโนดเลือกโลหะพื้น เช่น ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี หรือเงิน ในการเลือกสารละลายอิเล็กโตรไลต์จะต้องมีคุณสมบัติไม่ละลายขั้วอะโนด ที่อัตราสูงระดับหนึ่ง เมื่อวงจรเซลล์ไฟฟ้าเปิด

ในกรณีที่ตะกั่วเป็นขั้วอะโนด ปฏิกิริยาของเซลล์ เขียนได้ดังนี้

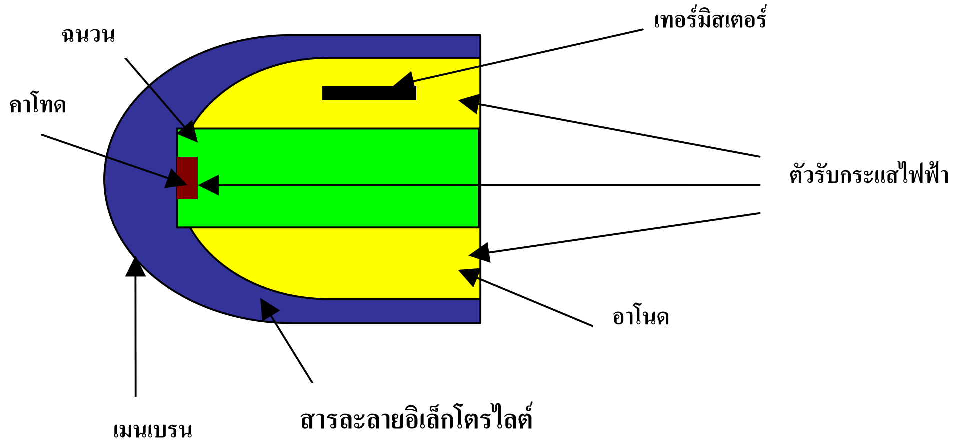
ขั้วคาโทด : $O_2 + 2H_2O + 4e^- \text{------>} 4OH^-$ (8)

ขั้วแอโนด : $2Pb + 6OH^- \text{------>} 2PbO_2H^- + 2H_2O + 4e^-$ (9)

ปฏิกิริยารวม : $O_2 + 2Pb + 2OH^- \text{------>} 2PbO_2H^-$ (10)

การออกแบบกัลป์วานิกส์เซลล์ ต้องคำนึงถึงการปนเปื้อนที่เกิดจาก background gasses ที่อยู่ใน process stream (ก๊าซที่รวมตัวกับน้ำแล้วเกิดเป็นกรด) ซึ่งนับว่าเป็นอันตราย ประกอบด้วย อาร์กอน บิวเทน คาร์บอนมอนออกไซด์อีเทนเอทิลีน ฮีเลียม ไฮโดรเจน มีเทน ไนโตรเจนโปรเปน แต่ก๊าซที่มีผลต่อเซลล์ในปฏิกิริยา อันได้แก่ คลอรีน หมู่ฮาโลเจนตัวอื่น ๆ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนตริกออกไซด์ และไนตรัสออกไซด์ ซึ่งจะมีผลต่อการวัด เพราะจะไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่หัววัด โดยจะทำให้ค่าที่วัดได้ผิดไปจึงได้มีการพัฒนาในการผลิตเซลล์ขึ้นมาเพื่อลด background gasses ให้มีน้อยที่สุด กรณีของก๊าซที่รวมตัวกับน้ำแล้วเกิดเป็นกรด จะเป็นกลางเมื่อรวมตัวกับที่ใช้โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายอิเล็กโตรไลต์ เซลล์พิเศษสามารถหาปริมาณออกซิเจนในก๊าซอะเซทิลีน และก๊าซเชื้อเพลิง

ในการออกแบบโพรบ ดังภาพที่ 3 ขั้วอิเล็กโตรดจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ได้ ขณะ ที่มวลอื่น ๆ อยู่ภายนอกโพรบ ไม่สามารถแพร่ผ่านแผ่นเมมเบรนได้ มีเซนเซอร์อยู่ที่ปลายโพรบเพื่อใช้วัดอุณหภูมิของตัวอย่างที่ต้องการวัด และยังมีเทอร์มิสเตอร์ เพื่อใช้ชดเชยกระแสในวงจร เมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างเปลี่ยนไปเป็นค่าต่าง ๆ



ภาพที่ 3 โพรบแบบกัลป์วานิกส์เซลล์ ใช้วัดหาออกซิเจน

โพรบวัดออกซิเจนที่ใช้ในโครงงานนี้คือ รุ่น EC -DO100 หัววัดออกซิเจนนี้มีเซนเซอร์วัดอุณหภูมิฝังอยู่ภายใน เซลล์แบบกัลป์วานิกส์ สามารถอ่านค่าได้ทันที โดยปราศจากการรอ ซึ่งต่างจากการวัดโดยใช้หัววัดแบบแอมเพอโรเมตริคที่ต้องทำการโพลาไรซ์ก่อน จึงอ่านค่าได้ คุณลักษณะ ของเมมเบรน ออกซิเจนต้องซึมผ่านง่าย คงทนแข็งแรง ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน อิออนอื่น ๆ และโมเลกุลของน้ำซึมผ่านไม่ได้ ที่สำคัญที่สุด ไม่มีปฏิกิริยา หรือผลอื่นใดกับสารละลายที่ต้องการวัด หัววัดที่มีลักษณะทนทานแบบกัลป์วานิกส์ จะตอบรับค่าได้อย่างรวดเร็ว และสามารถต่อการใช้งานอย่างสมบุกสมบัน สำหรับงานภาคสนาม การดูแลรักษาทำได้อย่างง่ายดาย ไม่สิ้นเปลืองเวลาและมีการชดเชยอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ

4. ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้เทคโนโลยีระบบฝังตัว (embedded system) เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูง ทำให้การควบคุมการทำงานจะเน้นไปที่การพัฒนาทางซอฟต์แวร์ (software) แทนการพัฒนาการด้านฮาร์ดแวร์ (hardware) เช่น ในอดีตส่วนใหญ่ผู้พัฒนาเทคโนโลยีระบบฝังตัวจะให้ความสำคัญ

กับไมโครโปรเซสเซอร์ หรือไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นหลักได้มีการเพิ่มหน่วยประมวลผลเข้าไปภายในตัวมัน การแบ่งระดับความซับซ้อนของระบบฝังตัวสามารถแบ่งได้หลายระดับ ระบบฝังตัวที่มีความซับซ้อนมาก ๆ จะใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ที่มีความสามารถสูงเป็นหน่วยประมวลผลกลาง เช่น ตระกูล x86 ของบริษัทอินเทล สำหรับระบบฝังตัวขนาดเล็กจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีการประมวลผลแบบ 4 บิต หรือ 8 บิต ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เหมาะสมกับการศึกษาในเบื้องต้นตัวหนึ่งก็คือไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

4.1 ลักษณะทั่วไปของ MCS-51 ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ 8 บิต เบอร์ 8051 โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนี้ จะมีหน่วยความจำประเภท RAM ขนาด 128 ไบต์ หน่วยความจำประเภท ROM ขนาด 4 กิโลไบต์ มีพอร์ตขนานขนาด 8 บิต จำนวน 4 พอร์ต มีไทเมอร์ 2 ตัว และพอร์ตอนุกรม 1 พอร์ต โดยทั้งหมดจะรวมอยู่ภายในชิปเพียงชิปเดียว และเนื่องจากหน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบ ROM ที่อยู่ภายในตัวมัน ดังนั้นการโปรแกรมการทำงานต้องโปรแกรมมาจากโรงงานที่ผลิตชิปนี้ออกมาโดยตรง นอกจากนี้บริษัทอินเทลยังได้ผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์ออกมาอีกหลายเบอร์ที่มีโครงสร้างภาย ในใกล้เคียงกับ 8051 โดยเรียกรวม ๆ ว่า ตระกูล MCS-51 หรือตระกูล 51 โดยการมีการปรับปรุงโครงสร้างภายใน และเพิ่มองค์ประกอบต่าง ๆ เข้าไปอีกดังตารางที่ 3 และยังมีบริษัทอื่น ๆ ผลิตตามออกมาด้วย แต่จะใช้เบอร์ที่เรียกแตกต่างกันออกไปในงานวิจัยนี่จะใช้ MCS-51 เบอร์ P89C51RD2

<u>ตารางที่ 3</u> ส่วนประกอบของไมโครคอนโทรลเลอร์

ส่วนประกอบ	8051	8052	AT89C51	P89C51RD2
หน่วยความจำ ROM ภายใน	4k	8k	Flash 4k	Flash 8k
หน่วยความจำ RAM ภายใน (byte)	128	256	128	256
Timers / เคาน์เตอร์16 บิต	2	3	2	3
I/O (บิต)	32	32	32	32
Serial port	1	1	1	1
Interrupt source	6	8	6	9

ที่มา: ธีรวัฒน์ (2546)

AT89C51 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ที่ผลิตโดย Atmel Corporation ตัวนี้จะมีหน่วยความจำภายในเป็นแบบ flash memory ทำให้ใช้งานสะดวกกว่า 8751 มาก เนื่องจาก AT89C51 สามารถโปรแกรมและลบโปรแกรมได้ด้วยกระแสไฟฟ้าบนชิปที่ต่ออยู่ในวงจรได้เลย

P89C51RD2 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ของ Philips Semiconductor โครงสร้างภายในจะคล้ายกับ MCS-51 มาตรฐาน แต่จะมีส่วนเพิ่มเติมขึ้นมาเช่น มีหน่วยความจำภายในเป็นแบบแฟลช และมีการบรรจุโปรแกรมบูตรอม (Boot ROM) เข้าไปภายในตัวมัน ทำให้สามารถเขียนหรือลบโปรแกรมได้โดยตรงโดยไม่ต้องถอดชิปออกจากวงจร ที่เรียกว่าการโปรแกรมแบบ ISP (In-System programming) ในปัจจุบันมีผู้ผลิตไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 นี้ออกมาหลายบริษัท และมีเบอร์ที่ใช้เรียกแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายในและเทคโนโลยีที่ใช้ในการสร้างชิป โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

803x : ไม่มีหน่วยความจำโปรแกรมภายใน เช่น 8031, 8032 เป็นต้น
805x : มีหน่วยความจำโปรแกรมประเภท ROM ภายใน
8xxx : ใช้เทคโนโลยีแบบ NMOS
8xCxx: ใช้เทคโนโลยีแบบ CMOS
87xx : มีหน่วยความจำโปรแกรมภายในเป็นแบบ EPROM
89xx : มีหน่วยความจำโปรแกรมภายในเป็นแบบ flash EPROM
8xx1 : มีหน่วยความจำโปรแกรมภายใน 4 กิโลไบต์ และมี RAM ภายใน 128 ไบต์

อย่างไรก็ตามแม้ว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 จะมีอยู่หลายเบอร์หลายรุ่น แต่ลักษณะการจัดขาของตัวชิปไอซีอาจแตกต่างกันไปบ้าง บางเบอร์มี 20 ขา บางเบอร์มี 40 ขา

4.2 โครงสร้างหน่วยความจำของ MCS-51 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ได้ออกแบบการจัดหน่วยความจำเป็นสองส่วน คือหน่วย ความจำโปรแกรม (program memory) และหน่วยความจำข้อมูล (data memory) โดยทั้งสองส่วนนี้จะมีแอดเดรสแยกออกจากกัน สำหรับ MCS-51 บางเบอร์จะมีหน่วยความจำโปรแกรมอยู่ภายในชิปบางเบอร์ต้องต่อเพิ่มภายนอกชิป

4.2.1 หน่วยความจำโปรแกรม (Program Memory) ใน MCS-51 จะมีหน่วย ความจำโปรแกรมได้สูงสุด 64 Kbyte หลังจากตัว MCS-51 ถูกรีเซตจะเริ่มต้นทำงานที่แอดเดรส 0000 ของหน่วยความจำโปรแกรมการอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำโปรแกรมนี้ จะต้องใช้คำสั่ง MOVC นอกจากนี้ในหน่วยความจำโปรแกรมยังแบ่งแอดเดรสบางส่วน สำหรับเก็บโปรแกรมตอบสนองอินเทอร์รัปต์ เช่นแอดเดรส 0003H เป็นตำแหน่งของโปรแกรมตอบสนองการอินเทอร์รัปต์จากภายนอก (INTO) เมื่อมีสัญญาณอินเทอร์รัปต์เข้ามาทางขานี้ โปรแกรมจะกระโดดไปทำงานยังตำแหน่งนี้ทันที

4.2.2 หน่วยความจำข้อมูลภายนอกของ MCS-51 สามารถมีได้ถึง 64 KByte เมื่อ MCS-51 ต้องการติดต่อกับหน่วยความจำส่วนนี้จะต้องใช้คำสั่ง MOVX และใช้รีจิสเตอร์ DPTR, R0 หรือ R1 ในการอ้างตำแหน่งหน่วย ความจำ ในการขยายพอร์ตเพิ่มให้กับ MCS-51 จะต้องใช้ตำแหน่งในส่วนนี้เป็นตำแหน่งของพอร์ตด้วย

4.2.3 หน่วยความจำข้อมูลภายใน MCS-51 จะมีหน่วยความจำข้อมูลภายในจำนวน 256 ไบต์ โดย 128 ไบต์แรกที่มีแอดเดรสอยู่ในช่วง 00H-7FH จะเป็นส่วนของ RAM ที่ใช้งานได้ทั่วไป รีจิสเตอร์แบงก์จำนวน 4 แบงก์ หน่วยความจำที่สามารถเข้าถึงข้อมูลระดับบิตได้ ส่วนอีก 128 ไบต์หลังเริ่มต้นตั้งแต่ แอดเดรส 80H เป็นต้นไป จะเป็นส่วนของรีจิสเตอร์ฟังก์ชั่นพิเศษ หรือ SFR (Special Function Register) และรีจิสเตอร์ที่ใช้งานทั่วไปเช่นรีจิสเตอร์ ACC, B, PSW, SP และ DPTR เป็นต้น การอ่านหรือเขียนข้อมูลกับหน่วยความจำในส่วนนี้จะใช้คำสั่ง MOV

4.2.4 ความเร็วในการทำงานของ MCS-51 การให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานนั้นจะต้องโปรแกรมให้กับตัวมันก่อน การวัดความเร็วในการทำคำสั่งของโปรแกรมจะดูจากรอบสัญญาณนาฬิกา หรือที่เรียกว่าแมชชีนไซเคิล ซึ่งในตารางคำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละตัวจะมีข้อมูลบอกได้ว่าการทำคำสั่งแต่ละคำสั่งจะใช้สัญญาณนาฬิกา กี่แมชชีนไซเคิลสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ทำงานที่สัญญาณนาฬิกา 12 MHz แล้ว การทำงาน 1 ไซเคิลจะมีค่าเท่ากับ 1 ไมโครวินาที หรือมีความเร็วในการทำงาน 1 MHz ถ้าหากต้องการให้ MCS-51 ตัวนั้นทำ งานได้เร็วขึ้นจะต้องเพิ่มสัญญาณนาฬิกาให้กับ MCS-51 สำหรับ MCS-51 บางเบอร์จะมีความเร็วมากขึ้นกว่าปกติ 2 เท่า เช่นเบอร์ P89C51RD2 เนื่องจากหนึ่งแมชชีนไซเคิลของ P89C51RD2 จะใช้สัญญาณนาฬิกาเพียง 6 ลูก

4.3 การพัฒนางานไมโครคอนโทรลเลอร์ การเรียนรู้ไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของบอร์ดฝังตัว (embedded board) จากนั้นก็พัฒนาโปรแกรมสำหรับใช้งานลงไป โดยบอร์ดที่ใช้ศึกษาอาจอยู่ในรูปของซิงเกิลบอร์ด (single board) ซึ่งมีความสะดวกในการพัฒนาโปรแกรมและแก้ไขโปรแกรมรวมทั้งมีโปรแกรมย่อยในรูปของ System Call ให้เรียกใช้ด้วย บอร์ดประเภทนี้จะมีอุปกรณ์แสดงผล และคีย์บอร์ดต่อยู่ด้วยซึ่งเหมาะสำหรับผู้ที่เริ่มต้นศึกษาทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ การโปรแกรมสามารถทำได้โดยป้อนออปโค้ดของโปรแกรมในรูปของเลขฐานสิบหกลงไป และยังสามารถเขียนโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ PC จากนั้นใช้โปรแกรมแปลภาษาให้เป็นออปโค้ดที่เรียกว่าการทำแอสเซมเบลอร์ (assembler) และโหลดโปรแกรมที่ได้ลงบนบอร์ดเพื่อใช้งานต่อไป

สำหรับการพัฒนาด้วยอีพรอมอีมูเลเตอร์ (EPROM emulator) ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้กันมานาน โดยทีบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะอยู่ในรูปของ embedded board ซึ่งมีราคาถูกกว่าแบบ ซิงเกิลบอร์ด โดยจะเขียนโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ PC และนำรหัสโปรแกรมที่ได้โปรแกรมลงบนอีพรอมอีมูเลเตอร์แทนที่จะโปรแกรมลงหน่วยความจำ ROM จริง ๆ วิธีนี้จะช่วยให้พัฒนาโปรแกรมได้ง่าย เนื่องจากว่าการแก้ไขโปรแกรมไม่ต้องใช้ตัวล้างหน่วยความจำ ถ้าหากโปรแกรมที่พัฒนาเป็นโปรแกรมที่ใช้ได้จริงไม่มีการแก้ไขส่วนใดอีกแล้วก็จะนำรหัสโปรแกรมที่ได้โปรแกรมลงหน่วยความจำ ROM จริง ๆ เพื่อใช้งาน ปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยเครื่องโปรแกรมแบบ single chip โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีหน่วยความจำภายในเป็นแบบแฟลช (flash memory) และโปรแกรมข้อมูลลงไปภายในตัวชิปเลย โดยชิปประเภทนี้สามารถโปรแกรมและลบโปรแกรมได้มากกว่า 1,000 ครั้ง นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาไมโครคอนโทรล -เลอร์ในรูปแบบของ ISP (In -System Programming) โดยไม่ต้องใช้เครื่องโปรแกรมลงบนชิป แต่จะโหลดโปรแกรมเข้าไปทางพอร์ตอนุกรมของชิปเลย แต่ราคาของชิปจะมีราคาสูงและในงานวิจัยนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่มีหน่วยความจำภายในเป็นแบบแฟลช (flash memory) นี้ด้วย

5. ไอซีฐานเวลา RTC (DS1307)

DS1307 จะทำงานเป็น Slave ในระบบบัส I^2C การเข้าถึงข้อมูลทำได้โดยการส่งเงื่อนไข Start เลขประจำตัวและตำแหน่งของรีจีสเตอร์ตามลำดับ วงจรออสซิลเลเตอร์ เป็นหัวใจหลักของไอซีเพราะเป็นจุดเริ่มต้นของเวลาจริงในขณะที่ DS1307 ทำงานที่ขา SQW/OUT จะมีสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมส่งออกมาตลอดเวลาในกรณีที่มีการอีนาเบิลวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ที่รีจีสเตอร์ควบคุม

ค่าความถี่นี่เลือกได้ 4 ค่าคือ 1 MHz, 4.096 KHz, 8.192 KHz, 32 KHz พร้อมกันนั้นก็จะเก็บค่าไว้ใน RAM แบบ Nonvolatile มีขนาดรวม 64 ไบต์แต่ใช้เก็บข้อมูลเวลา 8 ไบต์และเป็นหน่วยความจำเก็บข้อมูลทั่วไปอีก 56 ไบต์ IC DS1307 มีคุณสมบัติดังนี้

- เป็นนาฬิกาที่ให้ข้อมูลออกมาเป็น, ชั่วโมง, นาที, วินาที, วันที่ของเดือน, เดือน, วันของสัปดาห์, ปี, ใช้ได้ถึงปี 2100

- มี RAM แบบ Nonvolatile 56 ไบต์ใช้เก็บข้อมูลทั่วไปได้

- ตรวจสอบระบบไฟฟ้าและสลับไปใช้แบตเตอรี่ได้

6. <u>ทฤษฎีการแปลงสัญญาณแอนะลอกดิจิตอลแบบซักเซสซีฟแอปพร็อกซิเมชั่น</u>

การแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอล (A/D) ที่ได้รับนิยมสูงและมีประสิทธิภาพดีคือการแปลงแบบซักเซสซีฟแอปพร็อกซิเมชั่น วงจรA/D แบบซักเซสซีฟแอปพร็อกซิเมชั่นนี้จะใช้รีจิสเตอร์เลขฐานสอง ในการส่งข้อมูลดิจิตอลของวงจร D/A ภายใน แต่ละบิตของรีจิสเตอร์จะเซตและรีเซตโดยการควบคุมจากวงจรควบคุมวงจร A/D แบบซักเซสซีฟแอปพร็อกซิเมชั่นมีความเร็วในการทำงานสูงพอสมควรเหมาะอย่างยิ่งในการนำใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดกลางอย่าง MCS-51

6.1 ข้อมูลเบื้องต้นของไอซีแปลงรหัสสัญญาณADC PCF8591 มีวงจร A/D แบบซักเซสซีฟแอปพร็อกซิเมชั่นขนาด 8 บิต สูงถึง 4 ช่อง ทั้งยังมีวงจร D/A อีก 1 ช่องด้วย ระบบการเชื่อมต่อเป็นแบบบัส I^2C ทำให้ใช้สายสัญญาณเพียง 2 เส้น ทั้งยังสามารถต่อพ่วงกันได้สูงสุด 8 ตัว ทำให้ได้วงจร A/D รวมสูงถึง 32 ช่อง และวงจร D/A รวม 4 ช่อง มีรายละเอียดคุณสมบัติทางเทคนิคดังนี้

- ทำงานโดยใช้แหล่งจ่ายไฟชุดเดียว

- ทำงานที่แรงดัน 2.5 V ถึง 6 V

- กินกระแสไฟฟ้าขณะอยู่ใน สภาวะสแตนบายด์ต่ำ

- ติดต่อกับไมโครคอมพิวเตอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านระบบบัส I^2C

- เลือกตำแหน่งแอดเดรสทางฮาร์ดแวร์จากขา A0, A1, A2 สามารถต่อพ่วงกันได้สูงสุดถึง 8 ตัว

- อัตราการสุ่มข้อมูล (Sampling) ขึ้นอยู่กับความเร็วของสัญญาณนาฬิกาบนบัส I^2C

- วงจรแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอล (A/D) สามารถรับสัญญาณแอนะลอกได้ 4 ช่อง ทั้งยังเลือกได้ว่าให้ทำงานแบบแยกช่องหรือทำงานเป็นวงจรดิฟเฟอเรนเชียล

- การอ่านค่าสามารถกำหนดให้เลื่อนช่องอินพุตโดยอัตโนมัติได้

- สัญญาณแอนะลอกมีระดับแรงดันตั้งแต่ V_{SS} ไปจนถึง V_{DD}

- วงจรแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอลเป็นแบบซักเซสซีฟแอปพร็อกซิเมชั่นขนาด 8 บิต

- มีวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอก (D/A) ขนาด 8 บิต 1 ช่อง

ในการนำไอซี ADC PCF8591 ไปใช้งาน จะมีรายละเอียดฟังก์ชั่นต่าง ดังนี้

6.1.1 ตำแหน่งแอดเดรส ในระบบบัส I^2C การติดต่อกับอุปกรณ์แต่ละตัวต้องระบุแอดเดรสของอุปกรณ์เหล่านั้นอย่างชัดเจน ถ้าเป็นการอ้างถึงแบบ 7 บิต ข้อมูลกำหนดแอดเดรส 4 บิต บนจะเป็นค่าแอดเดรสเฉพาะของอุปกรณ์ตัวนั้น ๆ ที่กำหนดมาจากผู้ผลิต ผู้ใช้งานไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ สำหรับ ไอซี PCF8591 จะมีค่าเท่ากับ 1001 (ฐานสอง) ข้อมูล 3 บิตถัดมาจะเป็นค่าของแอดเดรสที่ผู้ใช้งานสามารถกำหนดได้ทางฮาร์ดแวร์เพื่อเลือก ไอซี PCF8591 ที่ต้องการติดต่อด้วยในกรณีที่มีการต่อใช้งาน PCF8591 มากกว่า 1 ตัว ส่วนบิต LSB ใช้ในการกำหนดว่าต้องการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับไอซีตัวนั้น ๆ

6.1.2 ข้อมูลควบคุม หลังจากส่งข้อมูลกำหนดแอดเดรสให้แก่ PCF8591 แล้ว ต้องส่งข้อมูลควบคุมตามไปด้วยเพื่อกำหนดคุณสมบัติของวงจรแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอลและวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอกภายใน PCF8591 โดยมีรายละเอียดของข้อมูลในแต่ละบิต

- บิต 6 ของข้อมูลควบคุมใช้สำหรับการเอ็นเนเบิล ขาแอนะลอกเอาต์พุต เมื่อต้องการเอ็นเนเบิลต้องกำหนดให้ขานี้เป็น “1”

- บิต 4 และ บิต 5 ของข้อมูลควบคุมใช้สำหรับการกำหนดรูปแบบของสัญญาณแอนะลอกอินพุตที่ป้อนให้แก่ PCF8591

- บิต 2 ใช้สำหรับเลือกรูปแบบการอ่านข้อมูลจากขาอินพุตแอนะลอกว่าจะเป็นการอ่านจากเพียงอินพุตเดียวหรืออ่านแบบเรียงลำดับทุกอินพุต ถ้าต้องการเลือกให้อ่านแบบเรียงลำดับต้องกำหนดให้บิตนี้เป็น “1”

- บิต 0 และ บิต 1 ใช้สำหรับกำหนดช่องของอินพุตแอนะลอกที่ต้องการอ่าน ถ้ากำหนดให้บิต 2 เป็น “1” หลังจากอ่านค่าของบิต “0” และบิต “1” แล้วในการอ่านค่าครั้งต่อไปจะอ่านค่าอินพุตจากช่องที่ 1 เมื่อจ่ายไฟให้แก่ PCF8591 ครั้งแรก บิตต่าง ๆ ของข้อมูลภายในรีจิสเตอร์ควบคุมจะเป็น “0”

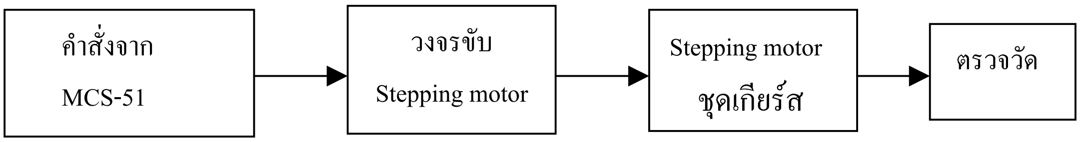
6.1.3 ออสซิลเลเตอร์ วงจรออสซิลเลเตอร์ภายใน PCF8591 จะสร้างสัญญาณนาฬิกาสำหรับการแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอล เมื่อต้องการให้วงจรออสซิลเลเตอร์ภายในขา EXT ต้องต่อลงกราวด์ ถ้าต้องการให้ออสซิลเลเตอร์จากภายนอกขา EXT ต้องต่อเข้ากับไฟบวก และป้อนสัญญาณนาฬิกาเข้าที่ขา OSC ของ PCF8591 โดยความถี่ของสัญญาณนาฬิกาสูงสุดที่ป้อนให้กับออสซิลเลเตอร์เท่ากับ 1.25 MHz

7. ทฤษฎีเบื้องต้นของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ (Stepping Motor)

ระบบอุปกรณ์กลซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนไหวได้มีอยู่ด้วยกันหลายชนิดสำหรับอุปกรณ์กลที่เป็นพื้นฐานที่สุดก็คือมอเตอร์ ในที่นี้จะกล่าวถึงการนำมอเตอร์แบบกระแสตรง และสเต็ปปิ้งมอเตอร์มาเชื่อมต่อกับ ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ ในงานวิจัยนี้จะใช้ระบบกลแบบ

เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงขึ้นและลงโดยใช้สเต็ปปิ้งมอเตอร์เป็นแกนหมุน และให้แกนนั้นหมุนเป็นวงกลมและถ่ายถอดกำลังให้กับชุดเกียร์สไลด์ทำหน้าที่เคลื่อนหัวโพรบวัดออกซิเจนขึ้นและลง

7.1 สเต็ปปิ้งมอเตอร์และการควบคุม มอเตอร์แบบกระแสตรง (DC motor) มีอยู่หลายประเภทขึ้นอยู่กับวิธีการสร้างการควบคุม สำหรับการหมุนของ สเต็ปปิ้งมอเตอร์จะใช้กระแสไฟตรง (DC: Direct current) จ่ายให้กับขดลวดสนามไฟฟ้าแต่ละขด เพื่อสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้า สำหรับแรงบิตของสเต็ปปิ้งมอเตอร์จะขึ้นกับเส้นแรงแม่เหล็ก ถ้าหากเส้นแรงแม่เหล็กมากจะทำให้มีแรงบิดสูง ถ้ามอเตอร์กระแสตรงหมุนด้วยความเร็วสูงจะมีแรงบิตต่ำ แต่ถ้าหมุนด้วยความเร็วต่ำจะมีแรงบิตสูง ระบบควบคุม สเต็ปปิ้งมอเตอร์ของงานวิจัยนี้สามารถเขียนได้ดังภาพที่ 4



<u>ภาพที่ 4</u> ไดอะแกรมระบบควบคุมสเต็ปปิ้งมอเตอร์

- คำสั่ง จะเป็นการสั่งว่าจะให้มอเตอร์ทำงานอย่างไร หมุนอย่างไร มีความเร็วอย่างไร และสั่งให้ MCS-51 สัญญาณควบคุมที่จะจ่ายให้กับสเต็ปปิ้งมอเตอร์

- วงจรขับ จะนำสัญญาณควบคุมมาขยายให้แรงขึ้น เพื่อให้ได้ระดับสัญญาณที่พอเหมาะสำหรับสเต็ปปิ้งมอเตอร์

- สเต็ปปิ้งมอเตอร์และชุดเกียร์สไลด์ สเต็ปปิ้งมอเตอร์จะหมุนชุดเกียร์สไลด์ซึ่งติดตั้งโพรบวัดออกซิเจนไว้นำลงน้ำ และนำขึ้นจากน้ำ

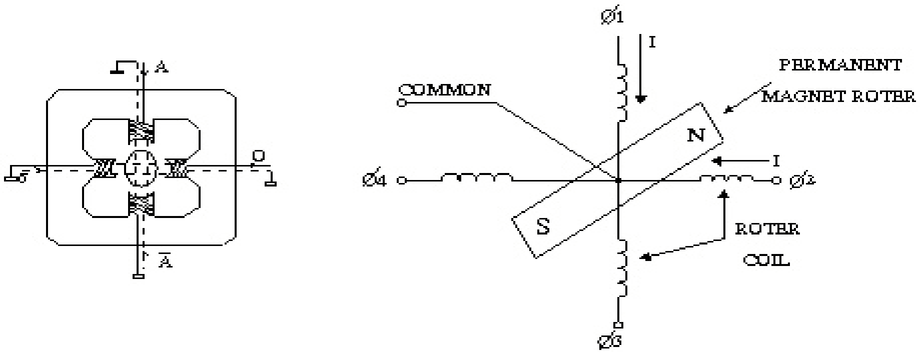
- ตรวจวัด ในการตรวจวัดนี้ MCS-51 จะทำตามคำสั่งที่เขียนไว้โดยการใช้เวลาในการหมุนขึ้นและลง ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ให้เท่ากัน

7.1.1 การควบคุมความเร็วของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ เมื่อเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ ตัวโรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วสูงสุดที่สามารถหมุนได้ด้วยแรงดันไฟฟ้าค่านั้น การควบคุมความเร็วจะทำได้โดยการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ แต่การทำงานแบบนี้จะต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า (power consumptions) และมีความร้อนเกิดขึ้นตลอดเวลา วิธีที่นิยมใช้จะใช้การจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นช่วง ๆ ให้กับสเต็ปปิ้งมอเตอร์แทน ถ้าหากช่วงการจ่ายแรงดันไฟฟ้าและหยุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกันไป ก็จะทำให้ความเร็วของการหมุนของมอเตอร์ต่างกันส่วนนี้จะอยู่ที่การเขียนโปรแกรมคำสั่งให้ MCS-51 กำหนดช่วง (Delay) ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ การควบคุมความเร็วด้วยวิธีนี้มีการใช้งานอยู่สองลักษณะคือ แบบ pulse-frequency modulation (PFM) และแบบ pulse-width modulation (PWM)

ก. แบบ pulse-frequency modulation หรือ PFM การทำงานแบบนี้จะควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าและหยุดจ่ายแรงดันไฟฟ้าเพื่อ เปิด-ปิด สเต็ปปิ้งมอเตอร์เป็นช่วง ๆ การทำงานแบบนี้จะทำให้ระดับแรงดัน ไฟฟ้าที่สเต็ปปิ้งมอเตอร์ได้รับมีค่าแตกต่างกันไป ความเร็วของการหมุนของสเต็ปปิ้งมอเตอร์จะขึ้นกับอัตราการ ปิด-เปิดนี้

ข. แบบ pulse-width modulation หรือ PWM การควบคุมมอเตอร์ในแบบ PFM ค่าความถี่ของสัญญาณควบคุมจะไม่แน่นอน แต่การควบคุมแบบ PWM นี้ จะใช้ความถี่ในการควบคุมที่คงที่ แต่จะปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับสเตปปิ้งมอเตอร์โดยวิธีการปรับค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) แต่วิธีนี้จะใช้กับความถี่สูงมาก ๆ ไม่ดี

7.2 สเต็ปปิ้งมอเตอร์และการควบคุม มอเตอร์แบบกระแสตรงนั้นเหมาะสำหรับงานหมุนที่ต่อเนื่อง เราสามารถควบคุมความเร็วและแรงบิดได้ แต่ไม่สามารถควบคุมให้หมุนเป็นระยะมุมที่ต้องการได้ ตัวมอเตอร์สเต็ป (stepping motor) เป็นมอเตอร์ที่ใช้กับกระแสไฟฟ้าตรงที่สามารถนำมาใช้กับงานควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ได้เป็นอย่างดีโดยสามารถหมุนเป็นลำดับขั้น หรือสเต็ป (step) รอบแกนหมุนด้วยค่ามุม (step angle) ที่แน่นอน สเต็ปปิ้งมอเตอร์สามารถแบ่งออกเป็นสามชนิด ซึ่งทั้งสามชนิดมีลักษณะโครงสร้างและวงจรเทียบเท่า (equivalent circuit) ดังภาพที่ 5 และมีมุมในการหมุนของโรเตอร์ดังตารางที่ 4



ก.   ข.

<u>ภาพที่ 5</u> ลักษณะของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ (ก) โครงสร้าง (ข) วงจรเทียบเท่า

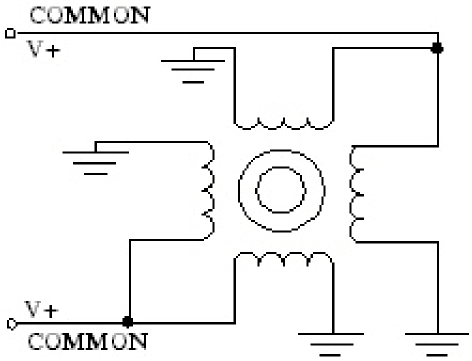
<u>ตารางที่ 4</u> แสดงมุมของโรเตอร์เทียบกับ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายแก่เฟสต่าง ๆ

เฟสที่จ่ายกระแสไฟฟ้า	ϕ_1	$\phi_1\phi_2$	ϕ_2	$\phi_2\phi_3$	ϕ_3	$\phi_3\phi_4$	ϕ_4	$\phi_4\phi_1$
ตำแหน่งโรเตอร์	⇧	⬀	⇨	⬂	⇩	⬃	⇦	⬁

ที่มา: บริษัท EET (2547)

7.2.1 แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet: PM) สเต็ปปิ้งมอเตอร์แบบ PM ตัวโรเตอร์หรือแกนหมุนจะทำด้วยแม่เหล็กถาวร และมีสเตเตอร์ (Stator) ทำด้วยขดลวด เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดจะทำให้เกิดแรงผลัก ทำให้โรเตอร์หมุนและเมื่อไม่จ่ายกระแสไฟฟ้าแกนหมุนก็จะหยุดอยู่กับที่ด้วยแรงแม่เหล็ก โดยทั่วไปสเต็ปปิ้งมอเตอร์แบบ PM จะมีอยู่ 2 ชนิด

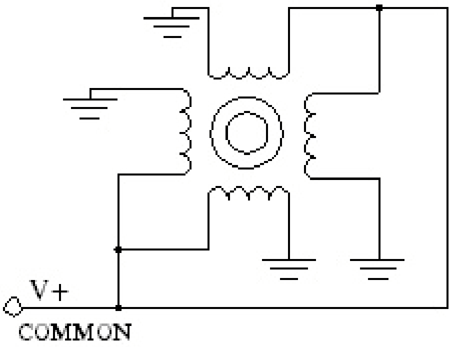
ก. ชนิดที่เป็น COMMON ภายนอก STEEPPING MOTOR แบบนี้มีจะสายไฟฟ้า 6 เส้น โดยจะจ่ายไฟฟ้าให้สายที่เป็น COMMON 2 เส้น และมีสายที่เป็น GROUND 4 เส้น ดังภาพที่ 6 หรือจะจ่ายไฟฟ้าให้ที่สาย GROUND 4 เส้นก็ได้โดยให้เป็นเฟส A B C D ตามลำดับ และให้สาย COMMON 2 เส้นเป็น GROUND แทน



<u>ภาพที่ 6</u> สเต็ปปิ้งมอเตอร์ ชนิดมีสาย 6 เส้น

ที่มา: บริษัท EET (2547)

ข. ชนิดที่เป็น COMMON ภายใน STEEPPING MOTOR แบบนี้มีสายไฟฟ้า 5 เส้น จ่ายไฟฟ้าให้สายที่เป็น COMMON 1 เส้น และสายที่เป็น GROUND 4 เส้นดังภาพที่ 7 หรือจะจ่ายไฟฟ้าให้ที่สาย GROUND 4 เส้นโดยให้เป็นเฟส A B C D ได้ และให้สาย COMMON 1 เส้นเป็น GROUND แทน



<u>ภาพที่ 7</u> สเต็ปปิ้งมอเตอร์ชนิดมีสาย 5 เส้น

ที่มา: บริษัท EET (2547)

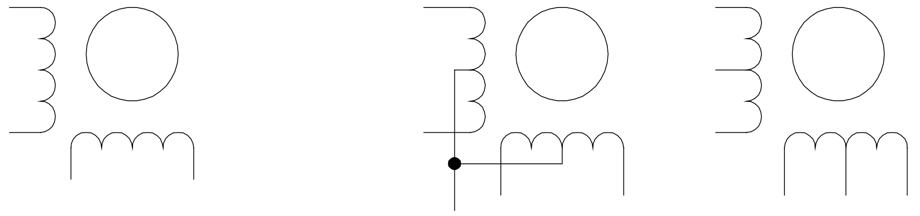
7.2.2 แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ (Variable reluctance: VR) สเต็ปปิ้งมอเตอร์แบบ VR แกนหมุนจะหมุนได้อย่างอิสระ ตัวโรเตอร์ทำด้วยสารฟอร์สโรแมกเนติกขนาดกำลังอ่อนสเต็ปปิ้งมอเตอร์แบบนี้ ตัวโรเตอร์จะมีลักษณะเป็นฟันเลื่อยซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนโพล (Pole) ของขดลวดสเตเตอร์ เพื่อกำหนดระยะมุมในการหมุนเมื่อเราป้อนกระแสไฟฟ้าให้ขดลวดสเตเตอร์ทำให้เกิดแรงบิดหมุนโรเตอร์ ให้เคลื่อนที่ไปที่เส้นแรงแม่เหล็กมีค่า Reluctance ต่ำที่สุด ทำให้สเต็ปปิ้งมอเตอร์จะมีความเร็วสูงและมีความแม่นยำสูง แต่แรงบิดน้อยกว่าแบบ PM

7.2.3 แบบ Hybrid : H จะเป็นการผสมกันระหว่างแบบ VR และ PM สเต็ปปิ้งมอเตอร์แบบนี้จะคล้ายกับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ แบบ VR แต่ที่โรเตอร์ จะมีหมวกที่ทำมาจากสารแม่เหล็กกำลังสูงหุ้มที่ปลายโรเตอร์ ซึ่งจะทำให้มีแรงบิดสูง และมีความแม่นยำสูงเพราะมีแรงฉุดให้โรเตอร์อยู่นิ่งเมื่อไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้สเต็ปปิ้งมอเตอร์

นอกจากนี้ ยังสามารถแบ่งตามลักษณะการพันของขดลวดบนสเตเตอร์ ซึ่งมี 2 แบบ ดังนี้

1) แบบไบโพลาร์ (Bipolar) มีการพันขดลวด 1 ขดบนแต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ ขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนสเตเตอร์ถูกกำหนดโดยทิศทางของกระแสไฟฟ้า และทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามได้โดยกลับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งกำหนดทิศทางการไหล และการกลับทิศทางของกระแสไฟฟ้า ทำได้โดยการใช้วงจรสวิตซ์ชิ่งกลับขั้วไฟฟ้า

2) แบบยูนิโพลาร์ (Unipolar) มีการพันขดลวด 2 ขด บนแต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ ซึ่งแต่ละขดจะทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามกัน การกลับขั้วของแม่เหล็กเปลี่ยนไปมาทำได้โดยการสวิตชิ่งกระแสไฟฟ้าจากขดลวดขดหนึ่งไปยังอีกขดหนึ่ง ขดลวดทั้งสองจะมีการเชื่อมต่อกันหรือมีจุดร่วม เพื่อลดจำนวนของสายไฟที่ต่อจากมอเตอร์วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ทำได้ง่ายกว่าชนิดไบโพลาร์ เพราะต้องการเพียงสวิตช์ธรรมดาในการเปิดและปิดกำลัง ไฟฟ้าให้กับขดลวดบนสเตเตอร์ในทิศทางที่ต้องการให้หมุนได้ทันที ลักษณะการพันของขดลวดบนสเตเตอร์ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ทั้งสองแบบนี้แสดงดังภาพที่ 8 การพิจารณาว่าสเต็ปปิ้งมอเตอร์ตัวใดมีการพันขดลวดแบบใดสังเกตได้ง่าย ถ้าเป็นแบบไบโพลาร์จะมีสายไฟต่อออกจากมอเตอร์เพียง 4 สาย และถ้าเป็นแบบยูนิโพลาร์จะมี 5 หรือ 6 สาย



แบบ 4 สาย 2 เฟส　　แบบ 5 สาย 4 เฟส　　แบบ 6 สาย 4 เฟส

(ก) แบบไบโพลาร์　　(ข) แบบยูนิโพลาร์

<u>ภาพที่ 8</u> ลักษณะการพันขดลวดสเตเตอร์

ที่มา: วรพจน์ (ม.ป.ป.)

7.2.4 วิธีการขับสเตปปิ้งมอเตอร์ให้หมุนโดยการกระตุ้นเฟส ในการควบคุมสเต็ปปิ้งมอเตอร์เพื่อที่จะให้ทำการหมุน มีวิธีการควบคุมกระแสไฟที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ (Stator) ในแต่ละเฟสของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ อย่างเป็นลำดับที่แน่นอน โดยถ้าหากเราต้องการให้กระแสไหลในเฟสใด ๆ ก็จะทำให้สถานะของเฟสนั้นๆเป็นสถานะลอจิก "1" และในการกระตุ้นเฟสของของสเต็ปปิ้งมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือแบบฟูลสเต็ปและฮาลฟ์สเต็ป

ก. การกระตุ้นแบบฟูลสเต็ปมอเตอร์ (Full Step Motor) สามารถแบ่งออกได้เป็นอีก 2 วิธี

1) การกระตุ้นเฟสแบบฟูลสเต็ป 1 เฟส (Single-Phase Driver) หรือแบบเวฟจะเป็นการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ทีละขด โดยจะป้อนกระแสเรียงตามลำดับกันไป ดังนั้นกระแส ที่ไหลในขดลวด จะทำการไหลในทิศทางเดียวกันทุกขด ลักษณะเช่นนี้จึงทำให้แรงขับของสเต็ปปิ้งมอเตอร์มีน้อย ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แบบฟูลสเต็ป 1 เฟส

สเต็ปที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1

2) การกระตุ้นเฟสแบบฟูลสเต็ป 2 เฟส (Two-Phase Driver) เป็นการป้อนกระแสให้กับขดลวด 2 ขด ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์พร้อม ๆ กันไป และจะกระตุ้นเรียงถัดกับไป เช่นเดียวกับแบบหนึ่งเฟส การกระตุ้นแบบนี้จึงต้องใช้กำลังไฟฟ้ามากขึ้น และจะทำให้มีแรงบิดของมอเตอร์มากกว่าการกระตุ้นแบบ 1 เฟส ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แบบฟูลสเต็ป 2 เฟส

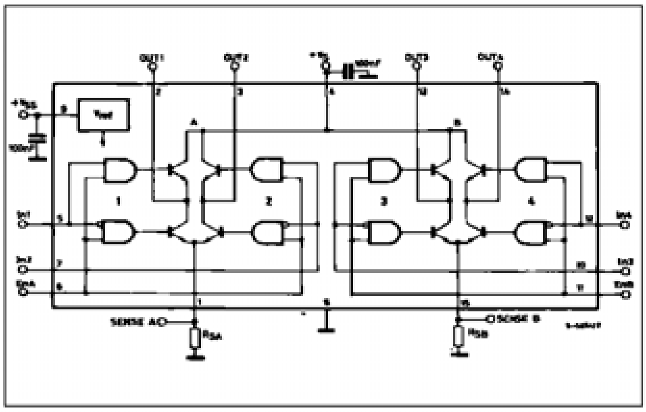
สเต็ปที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4
1	1	1	0	0
2	0	1	1	0
3	0	0	1	1
4	1	0	0	1

ข. การกระตุ้นเฟส แบบฮาลฟ์สเต็ป (Half Step Motor) หรือ one-two phase Driver คือการกระตุ้นเฟสแบบ ฟลูสเต็ป 1 เฟส และ 2 เฟส เรียงลำดับกันไป แสดงดังตารางที่ 7 แรงบิดที่ได้จากการกระตุ้นเฟสแบบนี้จะมีเพิ่มมากขึ้น เพราะช่วงของสเต็ปมีระยะสั้นลง ในการกระตุ้นแบบนี้ เราจะต้องมีการกระตุ้นที่เฟสถึง 2 ครั้ง จึงจะได้ระยะของสเต็ปเท่ากับการกระตุ้นเพียงครั้งเดียว ของแบบฟูลสเต็ป 2 แบบแรก ความละเอียดของการหมุนตำแหน่งองศาต่อสเต็ปก็เป็นสองเท่าของแบบแรกความถูกต้องของตำแหน่งจึงมีมาก

ตารางที่ 7 แบบฮาลฟ์สเต็ป 2 เฟส

สเต็ปที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1

ในการขับสเต็ปปิ้งมอเตอร์สามารถใช้ไอซีสำเร็จรูป และวงจรจากทรานซิสเตอร์ได้ ไอซีสำเร็จรูปที่นิยมใช้กัน ได้แก่ เบอร์ ULN2003 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นไอซีไดรเวอร์กระแสสูงแบบ คอลเล็คเตอร์เปิด สามารถเลือกแรงดันได้ในช่วง 5-30 V จ่ายกระแส 500 mA ต่อขา แต่ในงานวิจัยนี้ใช้ไอซีเบอร์ L298N จ่ายแรงดันได้ถึง 46 V จ่ายกระแสได้ 4 A แต่ต้องต่อไดโอดเพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับเข้าไอซี ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แสดงวงจรขับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ของไอซี L298N

8. <u>ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์</u> (SOLAR CELLS)

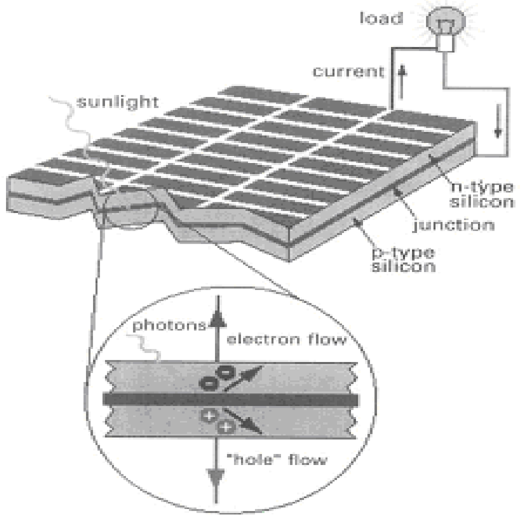
ด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาสู่ปัจจุบันกระบวนการแปรรูปพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า นับเป็นกระบวนการที่สะอาดและไร้มลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมเป็นพลังงานที่มีความยั่งยืนและต้นทุนพลังงานที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีราคาถูกกว่าแหล่งพลังงานประเภทอื่น โดยเฉลี่ยบนพื้นที่ 1 ตารางเมตร จะมีพลังงานแสงอาทิตย์ ประมาณ 4-5 KWh/m^2/day ฉะนั้นบนพื้นที่ 1 ตร.ม. จะมีพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบถึง 1,000 วัตต์ เป็นเวลานานถึง 4-5 ชั่วโมง (ดุสิต, 2542)

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสร้างแผงโซล่าเซลล์พัฒนาขึ้นมาก จึงทำให้มีการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์(Solar Cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานเท่ากับร้อยละ 15 ฉะนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีพื้นที่ 1 ตารางเมตร ซึ่งรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ 1,000 วัตต์ จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 150 วัตต์ หรือเฉลี่ย 600-750 Wh/m^2/day ถ้าประเทศไทยมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าประมาณ 250,000 MWh/m^2/day จะใช้พื้นที่ติดตั้งประมาณ 1,500 ตารางกิโลเมตร ก็สามารถผลิตไฟฟ้าได้เพียงพอกับความต้องการทั้งประเทศ (ดุสิต, 2542)

8.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กันแพร่หลายที่สุด ได้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งได้แก่ ซิลิคอน ซึ่งถลุงได้จาก ควอตไซต์หรือทราย ซึ่งเป็นวัสดุกึ่งตัวนำที่ราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนพื้นโลก เซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งแผ่นอาจมีรูปร่างเป็นแผ่นวงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว) มีความหนา 200-400 ไมครอน (0.2-0.4 mm) โดยจะต้องนำมาผ่านกระบวนการแพร่ซึมสารเจือปนในเตาอุณหภูมิสูง (ประมาณ 1000 C$^{\circ}$) เพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น (PN junction) ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นผิวสัมผัสโลหะเต็มหน้าส่วนด้านหน้าที่รับแสงจะมีลักษณะเป็นลายเส้นคล้ายก้างปลา

โครงสร้างที่สำคัญของโซล่าเซลล์มีลักษณะเหมือนกับไดโอดโดยทั่ว ๆ ไป ซึ่งประกอบด้วยรอยต่อระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน 2 ชั้น ได้แก่สารกึ่งตัวนำชนิด P (ขั้วบวก) และสารกึ่งตัวนำชนิด N (ขั้วลบ) สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้งานในลักษณะดังกล่าว ส่วนมากเป็นซิลิกอน ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจในเอกสารฉบับนี้ จะกล่าวถึงเฉพาะสารกึ่งตัวนำที่ทำมาจากซิลิกอนเท่านั้น ในปัจจุบันโซล่าเซลล์สามารถผลิตขึ้นจากวัสดุชนิดอื่น ๆ ก็ได้

ลักษณะโครงสร้างของตัวเซลล์ โซล่าเซลล์ที่ผลิตขึ้นจากซิลิกอนประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด N ที่ผลิตขึ้นจากผลึกของซิลิกอนที่ได้ผ่านการเติมสารเจือปนจำนวนเล็กน้อย (โดยปกติใช้ฟอสฟอรัส) เป็นแนวทางที่ทำให้เกิดอิเลคตรอนอิสระส่วนเกินซิลิกอนที่ผ่านการเติมสารเจือด้วยกระบวนการดังกล่าวเรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิด N (ขั้วลบ) และสารกึ่งตัวนำชนิด P ผลิตขึ้นจากผลึกของซิลิกอนแต่ใช้สารเจือปนต่างชนิดกับชนิดแรก (โดยปกติใช้โบรอน) เป็นแนวทางที่ทำให้วัสดุขาดอิเลคตรอนอิสระการที่ไม่มีอิเลคตรอน ดังกล่าว จึงเรียกว่า โฮล (Hole) ซึ่งการขาดอิเลคตรอนที่เป็นประจุลบ จึงสามารถพิจารณาเทียบเคียงเป็นอนุภาคของประจุบวก ซิลิกอนที่ผ่านการเติมสารเจือด้วยกระบวนการดังกล่าวเรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิด P (ขั้วบวก) ดังภาพที่ 10 รอย ต่อ P-N เกิดจากการเชื่อมต่อกันของสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติต่างกัน ซึ่งจะทำให้เกิดสนาม ไฟฟ้า (Electric field) ในบริเวณรอยต่อสนามไฟฟ้าดังกล่าวมีลักษณะเหมือนกับสนามไฟฟ้าสถิตที่สามารถทำให้เกิดขึ้นได้โดยการถูหวีพลาสติกกับเสื้อขนสัตว์ ซึ่งจะทำให้เกิดอนุภาคของประจุลบเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง และอนุภาคของประจุบวกที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ตรงข้าม



ภาพที่ 10 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา: Roberts (1991)

พลังงานจากแสงอาทิตย์ที่ส่องมายังโลก เป็นการไหลต่อเนื่องของอนุภาคเล็ก ๆ ของพลังงานที่เรียกว่า โฟตอน เมื่อโฟตอนจากลำแสงที่มีความความยาวคลื่นที่เหมาะสม ตกลงบนรอยต่อ P-N จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานจากโฟตอนไปยังอิเลคตรอนบางตัวในวัสดุ ซึ่งเป็นการกระตุ้นให้อิเลคตรอนเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานไปยังระดับที่สูงกว่า โดยปกติอิเลคตรอนดังกล่าวจะทำให้เกิดโฮลขึ้นในวัสดุในเวลาเดียวกัน อิเลคตรอนที่เปลี่ยนเป็นอิเลคตรอนอิสระ จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าโดยการเคลื่อนที่ของอิเลคตรอนตลอดวัสดุ เมื่ออิเลคตรอนเคลื่อนที่ออกไปจะทำให้เกิดโฮลขึ้นในวัสดุที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเลคตรอนในเซลล์พลังงานที่ต้องการในการกระตุ้นให้อิเลคตรอนเคลื่อนที่ไปยังแถบนำพลังงานต้องมากแถบ พลังงานต้องห้าม (Energy Band Gap) อิเลคตรอนที่ได้รับการกระตุ้นจะเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ชั้นของซิลิกอนชนิด N และโฮลที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ไปของอิเลคตรอนจะเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ชั้นของซิลิกอนชนิด P อิเลคตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังที่รวมกระแสที่ผิวด้านหน้าของเซลล์ การเคลื่อนที่ของอิเลคตรอนไปยังบริเวณผลึกชนิด N สามารถทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ เมื่อต่อไปยังวงจรภายนอกทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตลอดวงจร การเคลื่อนที่ไปยังวงจรภายนอกของอิเลคตรอนในกรณีของสารกึ่งตัวนำโดยการผ่านวัสดุตัวนำที่ยึดติดอยู่กับผิวด้านหน้าของเซลล์ ในเวลาเดียวกันโฮลจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามผ่านตลอดเนื้อเซลล์จนไปถึงวัสดุตัวนำอีกส่วนหนึ่งที่ยึดติดอยู่กับด้านล่างของเซลล์ ทำให้ครบวงจร ถ้าโฟตอนมีพลังงานมากกว่าแถบพลังงานต้องห้าม เมื่อปะทะกับอะตอมของซิลิกอน จะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นคู่ของอิเลคตรอนและโฮล และพลังงานที่เหลือจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน แต่ถ้าโฟตอนมีระดับพลังงานน้อยกว่าแถบพลังงานต้องห้ามจะเคลื่อนที่ผ่านเซลล์ไป ซึ่งไม่ทำให้เกิดพลังงานตลอดระยะทางที่เคลื่อนที่ผ่าน และมีโฟตอนบางส่วนสะท้อนที่ผิวด้านหน้าของเซลล์ ที่ราบเรียบเมื่อผิวหน้าเคลือบด้วยสารป้องกันการสะท้อน แม้กระนั้นก็มีโฟตอนบางส่วนสูญเสียไปเนื่องจากไม่สามารถปะทะกับผลึกได้เนื่องจากถูกปิดบังด้วยอุปกรณ์รวมกระแสที่ด้าน หน้าของตัวเซลล์เอง เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ ดังภาพที่ 10 จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าประจุลบและบวกขึ้น โครงสร้างรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์เพื่อแยกพาหะไฟฟ้าชนิดลบ (อิเล็กตรอน) ให้ไหลไปที่ขั้วลบและทำให้พาหะนำไฟฟ้าชนิดบวก (โฮล) ไหลไปที่ขั้วบวก ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นที่ขั้วทั้งสองเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขายในท้องตลาดจะถูกออกแบบให้อยู่ในกรอบอลูมิเนียมสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งเรียกว่า แผง หรือ มอดูล เซลล์แสงอาทิตย์ 1 มอดูล จะให้กระแส ไฟฟ้ามาก ๆ ก็ทำได้โดยการนำเซลล์มาต่อขนานกันหรือถ้าต้องการให้ได้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น ก็สามารถทำได้โดยนำเซลล์มาต่ออนุกรมกัน

8.2 การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ กระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเป็นไฟฟ้ากระแสตรงถ้าจ่ายไฟฟ้าให้เครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสตรง เช่น หลอดแสงสว่างกระแสตรงจะสามารถต่อเซลล์แสงอาทิตย์กับเครื่องใช้ไฟฟ้าให้เครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสตรงได้โดยตรง แต่ถ้าเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ เช่น ตู้เย็น เครื่องปรับอากาศ ในระบบจะต้องต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้าอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับก่อนอินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับในการแปลงดังกล่าวจะมีการสูญเสียเกิดขึ้นเสมอโดยทั่วไปประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์มีค่าประมาณร้อยละ 85 – 90 (ดุสิต, 2542) หมายความว่า ถ้าต้องการไฟฟ้า 170 - 180 วัตต์ เราควรเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ขนาด 200 วัตต์ เป็นต้น ส่วนในเวลากลางคืนจะมีแบตเตอรี่เก็บประจุไฟฟ้าและจ่ายกระแสไฟฟ้าในรูปไฟฟ้ากระแสตรงเพิ่มเข้ามาในระบบด้วย โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมการประจุไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่เลือกว่าจะส่งกระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ไปยังอินเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายให้อุปกรณ์ไฟฟ้าหรือส่งไปเก็บประจุไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ ซึ่งในเวลากลางคืนจะทำหน้าที่ตัดวงจรเซลล์แสงอาทิตย์ออกจากระบบและต่อแบตเตอรี่ไปยังอินเวอร์เตอร์เพื่อจ่ายให้อุเครื่องใช้ไฟฟ้า สถานที่ติดตั้งแผงเซลล์แสง อาทิตย์ควรเป็นที่โล่งอาจอยู่บนพื้นดินหรือบนหลังคาบ้านก็ได้ ควรวางให้หันหน้าไปทางทิศใต้และเอียงประมาณ 10-15 องศา (ดุสิต, 2542) จะช่วยให้เซลล์แสงอาทิตย์รับแสงได้มากที่สุด

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้จะเป็นด้านการวัดออกซิเจนที่ละลายน้ำและงานวิจัยด้านเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น

เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Dissolved oxygen meter) (ศุภพร, 2538) เป็นการวิจัยที่ใช้หัวโพรบวัดออกซิเจน (Oxygen sensor) แบบ Clark Electrode ซึ่งเป็นแบบ โพลาโรกราฟิกเซ็นเซอร์ (Polaragraphic sensor) โดยการนำสัญญาณที่ได้ผ่านวงจรขยายสัญญาณแล้วส่งผลต่อไปให้ภาคแสดงผลที่เป็นมิเตอร์แบบเข็มชี้ที่ผ่านการปรับค่าให้ถูกต้องตามมาตรฐาน แต่ก็อาจผิดพลาดได้เนื่องจากการดูค่าด้วยสายตาของแต่ละบุคคลที่ไม่แน่นอนและไม่สะดวกต่อการใช้งาน

เครื่องวัดคุณภาพน้ำเพื่อการใช้เลี้ยงกุ้ง (Water quality instrument aquaculture) (กัลยา, 2544) ซึ่งเป็นการออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดออกซิเจนที่ละลายน้ำ และพีเอช สามารถวัดค่าออกซิเจนละลายที่น้ำได้ 0 – 20 mg/l และวัดค่าพีเอช 0 – 14 pH ใช้ไมโครคอนโทรเลอร์เป็นตัวประมวลผล

ซึ่งใช้ภาษาแอสเซมบลีในการเขียนโปรแกรม โดยสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากหัวโพรบวัดออกซิเจน (แบบClark Electrode) จะถูกขยายสัญญาณแล้วส่งไปยังวงจรแปลงรหัสสัญญาณ แอนะลอกเป็นดิจิตอล (ADC) 8 บิตแบบขนาน ซึ่งต่อเชื่อมกับพอร์ต 8 พอร์ตของไมโครคอนโทรเลอร์เพื่อส่งข้อมูลดิจิตอลแบบขนานให้ไมโครคอนโทรเลอร์ประมวลผล และแสดงผลออกที่จอ LCD

เครื่องมือวัดและควบคุมปริมาณออกซิเจนในน้ำ (Instrument and Dissolved Oxygen Volume Control in Water System) (เจตต์, 2545) ซึ่งเป็นการออกแบบและสร้างเครื่องมือควบคุมปริมาณออกซิเจนแบบอัตโนมัติ ที่สามารถตั้งค่าวัดออกซิเจนได้ 4 mg/l, 5mg/l, 6mg/l ถ้าปริมาณออกซิเจนต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ก็ให้มอเตอร์หมุนกังหันตีน้ำ เมื่อถึงการวัดอีกรอบถ้าออกซิเจนที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้นมามากกว่าหรือเท่ากับค่าออกซิเจนที่ตั้งไว้มอเตอร์หมุนกังหันตีน้ำก็หยุดทำงาน งานวิจัยนี้ใช้หัวโพรบวัดออกซิเจน (แบบClark Electrode) สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการวัดจะถูกขยายสัญญาณแล้วส่งไปยังวงจรแปลงรหัสสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอล (ADC) 8 บิตแบบขนาน ซึ่งต่อเชื่อมกับพอร์ต 8 พอร์ตของไมโครคอนโทรเลอร์เพื่อส่งข้อมูลดิจิตอล 8 บิตแบบขนานให้ ไมโครคอน-โทรเลอร์ ประมวลผลเทียบกับค่าออกซิเจนที่ตั้งมาจาก สวิตซ์ปุ่มกด 3 ปุ่ม ซึ่งแทนค่าออกซิเจน 4 mg/l, 5mg/l, 6mg/l ตามลำดับ ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการยังไม่ได้นำไปใช้งานจริง

งานวิจัยด้านพลังงานแสงอาทิตย์มีหลายโครงการดังเช่นโครงการสาธิตการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาบ้าน (กฟผ., 2541) เป็นการทดสอบใช้งานพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ไฟฟ้าส่วนที่เหลือก็สามารถขายคืนให้กับการไฟฟ้าได้โดยผ่านมิเตอร์ (มิเตอร์หมุนได้2 ทาง) ในการสาธิตบ้าน 1 หลังติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอนซึ่งมีกำลังไฟฟ้าเอาท์พุท 75 W/แผง ติดตั้งจำนวน 30 แผงโดยต่ออนุกรมกัน 15 แผง 2 ชุดได้กำลังไฟฟ้า 2,250 W, แรงดันไฟฟ้า 255V, กระแสไฟฟ้า 8.8 A แล้วต่อเข้ากับอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ที่ให้กำลังเอาท์พุทสูงสุด 5 KW, แรงดันไฟฟ้า 220 V, 50Hz แล้วต่อเข้ากับแผงควบคุมและมิเตอร์ไฟฟ้า การสาธิตนี้จะไม่ใช้แบตเตอร์รี่ในการเก็บกระแสไฟฟ้า

ชุดเติมอากาศลงบ่ออนุบาลเลี้ยงปลาด้วยไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (ดุสิต, 2544) ติดตั้งใช้งานจริงที่ศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน จังหวัดจันทบุรี เป็นงานวิจัยที่ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน ขนาด 65 W 2 แผง ป้อนกระแสไฟฟ้าให้แบตเตอร์รี่ขนาด 50 Ah และต่อไปเข้ากับเครื่องเป่าลมไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งทำงานตลอดเวลา 24 ชั่วโมง